

# FORSCHUNGS- REPORT [ws 2014/15]

The background of the entire page is a deep blue color. Overlaid on this background is a complex, abstract pattern of white and light blue lines that resemble a circuit board or a network diagram. These lines are of varying thickness and form various shapes, including straight segments, curves, loops, and small circles. Some of these lines are highlighted with small, bright white dots, giving the impression of active nodes or data points. The overall effect is a high-tech, digital aesthetic.

■ ■ ■ für die Elektrotechnik in Baden-Württemberg

ISSN 2199-4889

# Energieeffizienter Betrieb von Asynchronmaschinen – Methoden und Potential

## Einleitung

Vor dem Hintergrund der Diskussion um die Energiewende gewinnt die Frage nach einem effizienten Einsatz elektrischer Energie zunehmend an Bedeutung. Dies betrifft insbesondere die im industriellen Umfeld weit verbreiteten Asynchronmaschinen, die als robuste und kostengünstige Antriebe geschätzt werden.

Ein Nachteil der Asynchronmaschinen ist deren vergleichsweise schlechter Wirkungsgrad im Teillastbereich. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Verfahren entwickelt, mit denen der Wirkungsgrad der Maschine durch eine intelligente Betriebsführung verbessert wird. Das Ziel dieses Beitrags ist es, anhand von zwei Maschinen unterschiedlicher Baugröße das Potential zur Energieeinsparung darzustellen, um dem Anwender einen Hinweis auf den Nutzen solcher Verfahren zu geben.

Dazu werden im folgenden Abschnitt kurz einige Grundlagen zu Verfahren zur energieeffizienten Betriebsführung dargestellt. Daran anschließend wird anhand von Messungen das Potential zur Energieeinsparung ermittelt und diskutiert. Die Ergebnisse werden im letzten Abschnitt zusammengefasst.

## Energieeffiziente Betriebsführung

In der Abbildung 1 ist die anhand der Motorparameter berechnete Verlustleistung einer Asynchronmaschine mit einer Nennleistung von 370W als Kurvenschar in Abhängigkeit des Magnetisierungsstroms  $I_{1d}$ , d.h. derjenigen Komponente des Statorstromzeigers, mit der das Ro-

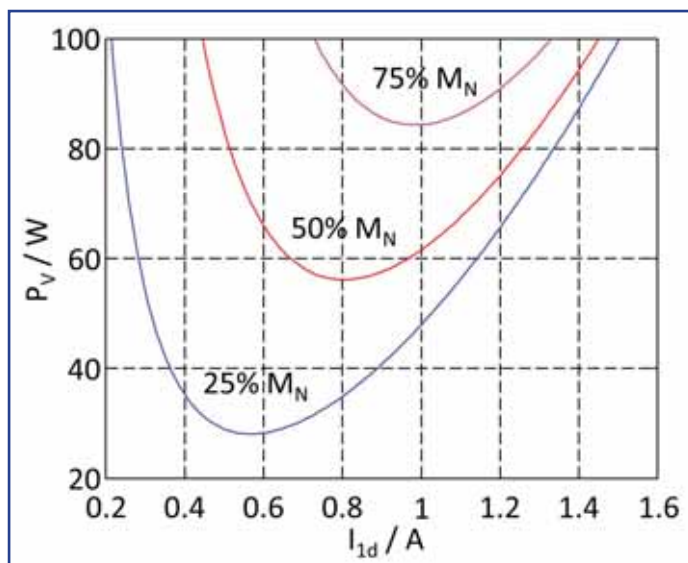


Abbildung 1: Verlustleistung und Magnetisierungsstrom

tormagnetfeld aufgebaut wird, für 25%, 50% und 75% des Motornennmoments in dem jeweils entsprechenden stationären Betriebspunkt der Maschine dargestellt.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass für jeden der drei Betriebspunkte ein optimaler Wert für den Magnetisierungsstrom  $I_{1d}$  existiert, bei dem die Verlustleistung  $P_v$  minimal wird. Die Verwendung des Magnetisierungsstroms als Stellgröße zur Reduzierung der Verlustleistung ist für feldorientierte Verfahren gut geeignet.

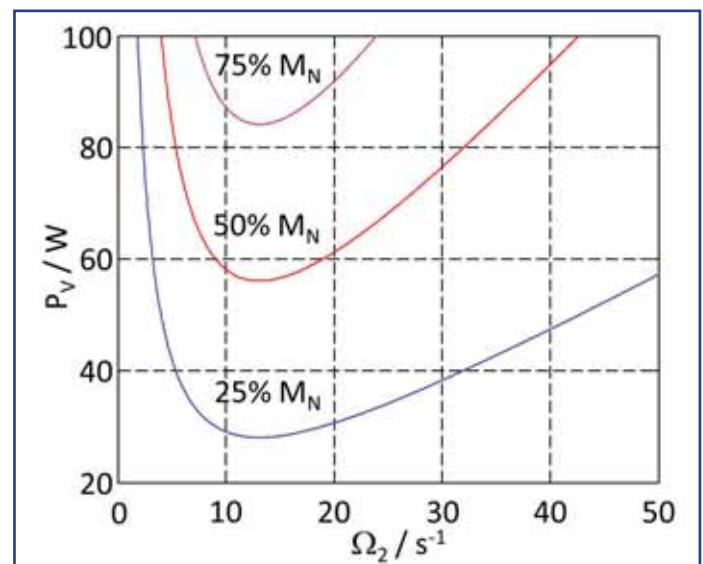


Abbildung 2: Verlustleistung und Schlupffrequenz

Als Stellgröße zur Reduzierung der Verluste bei den einfacheren U/f-Verfahren bieten sich andere Prozessgrößen wie z.B. die Schlupffrequenz  $\Omega_2$  an. Der Zusammenhang zwischen der Schlupffrequenz und der Verlustleistung wird für eine Asynchronmaschine mit der Nennleistung von 370W in der Abbildung 2 veranschaulicht.

Dieses Verhalten ist Ausgangspunkt der im Folgenden kurz diskutierten Verfahren zur energieeffizienten Betriebsführung.

Ziel dieser Verfahren ist es, in einem durch ein Drehmoment und eine Drehzahl vorgegebenen stationären Betriebspunkt die Prozessgrößen so einzustellen, dass ein Minimum an Verlusten erreicht wird.

Bei den in der Abbildung 3 prinzipiell dargestellten parameterbasierten Verfahren werden die jeweiligen Prozessgrößen direkt anhand des Arbeitspunktes und der gegebenen Motorparameter berechnet. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass der neue Betriebspunkt unverzüglich eingestellt werden kann. Nachteilig ist die Abhängigkeit des Optimierungsergebnisses von den Motorparametern.

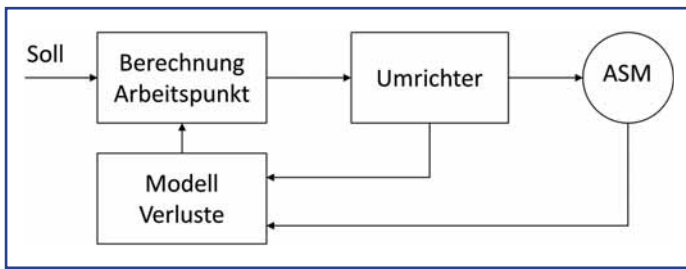


Abbildung 3: Parameterbasierte Verfahren

Bei den prinzipiell in der Abbildung 4 dargestellten Suchverfahren wird eine andere Vorgehensweise gewählt. Ausgehend von einem stationären Betriebspunkt wird eine der Prozessgrößen mit einem Suchverfahren so verändert, dass die gemessene vom Motor aufgenommene elektrische Leistung minimiert wird.

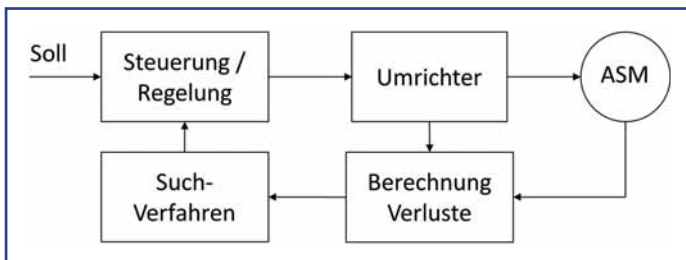


Abbildung 4: Suchverfahren

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in deren Parameterunabhängigkeit. Der Nachteil solcher Verfahren ist insbesondere die langsame Konvergenz.

Für beide Verfahrensklassen wurden bisher zahlreiche Methoden entwickelt, die sich in der Art der verwendeten Prozessgrößen, der Optimierungs- und Suchverfahren, der Berücksichtigung der einzelnen Verlustmechanismen oder des Umgangs mit Parameteränderungen unterscheiden. Ein Überblick über diese Verfahren wird in <sup>[1]</sup> und <sup>[2]</sup> gegeben.

Für die Minimierung der Verluste bei dynamischen Übergängen, wie Sie z.B. in Servoanwendungen stattfinden, existieren nur wenige Methoden, wie die auf einer online durchgeführten numerischen Optimierung basierende Methode aus <sup>[3]</sup> oder ein modellprädiktives Verfahren aus <sup>[4]</sup>. Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf die Reduktion der Verluste in stationären Betriebspunkten und zeigt das Potential dieser Verfahren für zwei Motoren unterschiedlicher Baugröße und unterschiedliche Belastungszustände.

## Potential zur Energieeinsparung

Im vorliegenden Abschnitt wird das Potential zur Energieeinsparung für zwei Motoren mit einer Nennleistung von 370W bzw. 4kW an dem in der Abbildung 5 dargestellten Prüfstand aus dem Labor für Elektrische Antriebstechnik untersucht.

In beiden Fällen wird die Einsparung aufgrund einer energieeffizienten Betriebsführung im stationären Zustand mit unterschiedlichen Lastmomenten analysiert. Dabei wird für jeden betrachteten Lastpunkt die Ver-

lustleistung mit und ohne energieeffiziente Betriebsführung verglichen und daraus die eingesparte Verlustleistung bestimmt.



Abbildung 5: Antriebsprüfstand

Für die Durchführung der Messungen werden beide Motoren mit dem Steuerverfahren U/f mit einer Leerlaufdrehzahl von  $1000\text{min}^{-1}$  betrieben. Die Schlupfkompensation ist aktiv um sicherzustellen, dass die Drehzahl und somit die abgegebene mechanische Leistung auch bei Belastung unverändert bleibt.

Ebenso ist die IxR-Kompensation des Statorwiderstands aktiviert. Die optimale Schlupfkreisfrequenz für ein Minimum an Verlusten wird über die Steigung der U/f-Kennlinie eingestellt.

Die Verlustleistung wird hier aus der Differenz der Wirkleistung an den Klemmen des Motors und der an der Welle abgegebenen mechanischen Leistung bestimmt. Die so ermittelte Verlustleistung enthält daher zwar auch die mechanischen Verluste, da diese jedoch im Wesentlichen von der Drehzahl abhängig sind, wird aus den Messdaten die Energieeinsparung aufgrund der Betriebsführung deutlich.

Die Abbildung 6 zeigt für die betrachteten Asynchronmaschinen die Verlustleistung im Optimum als blauen und die durch die energieeffiziente Betriebsführung eingesparte Verlustleistung als roten Balken jeweils bezogen auf die Nennleistung des Motors für 25%, 50% und 75% des Motornennmoments. Die Messungen zeigen, dass erwartungsgemäß die Verluste mit steigender Belastung zunehmen. Ebenso wird deutlich, dass insbesondere im unteren Teillastbereich erhebliche Einsparungen möglich sind. Mit steigendem Drehmoment nimmt das Einsparpotential ab.

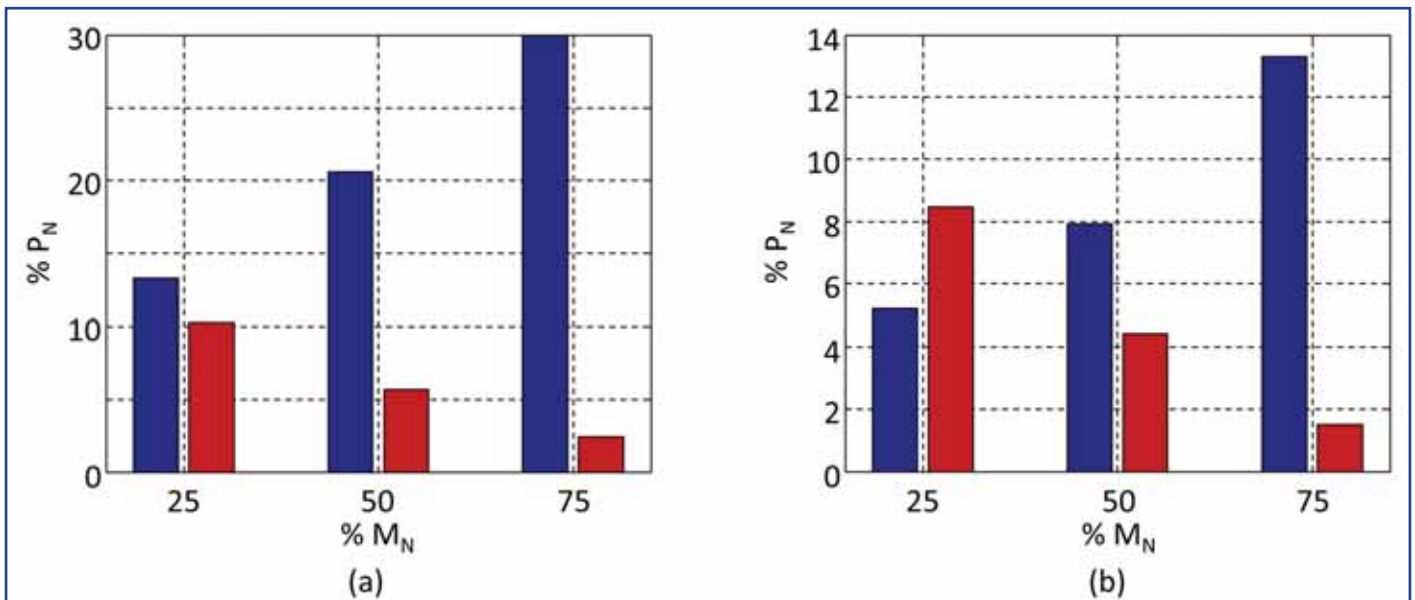


Abbildung 6: Verlustleistung und Einsparpotential für eine Asynchronmaschine mit der Nennleistung von 370W (a) und 4kW (b)

## Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag stellte die beiden Verfahrensklassen parameterbasierte Verfahren und Suchverfahren für eine energieeffiziente Betriebsführung von Asynchronmaschinen im stationären Zustand kurz vor und zeigte das Potential zur Reduktion der Verlustleistung in stationären Arbeitspunkten für zwei Motoren unterschiedlicher Baugröße. Dabei wurde deutlich, dass insbesondere im unteren Teillastbereich eine erhebliche Verringerung der Verlustleistung erzielt werden kann.

## Literaturverzeichnis

- <sup>[1]</sup> Flemming Abrahamsen: Energy Optimal Control of Induction Motor Drives. Dissertation, Institute of Energy Technology, Aalborg University, 2000.
- <sup>[2]</sup> Gernot Schullerus: Methoden zur energieeffizienten Betriebsführung von Asynchronmaschinen - Ein Überblick. In Tagungsband Antriebssysteme 2013, Seiten 34-39, Nürtingen, 2013.
- <sup>[3]</sup> Jean-Francois Stumper, Alexander Dötlinger und Ralph Kennel: Loss Minimization of Induction Machines in Dynamic Operation. IEEE Transactions on Energy Conversion, Bd. 28, Nr. 3, Seiten 726-735, 2013.
- <sup>[4]</sup> Gernot Schullerus: Modellprädiktive dynamisch energieeffiziente Betriebsführung einer Asynchronmaschine. Erscheint in Tagungsband SPS/IPC/DRIVES 2014, Nürnberg, 2014.

## ■ Autor ■ ■ ■

Prof. Dr.-Ing. Gernot Schullerus  
Forschungsgruppe Energie- und Ressourceneffizienz  
Fakultät Technik

Hochschule Reutlingen  
Alteburgstraße 150  
D-72762 Reutlingen

Tel.: +49 (0) 7121 / 271-7045